

برآورد تغییرات نرخ برخاستگی با استفاده از ترازیبی دقیق در البرز مرکزی، شمال ایران

احسان صابری^۱، علی یساقی^{۲*}، یحیی جمور^۳، سعید معدنی پور^۴

۱- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی تکتونیک، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار گروه زمین‌شناسی تکتونیک، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار آموزشکده نقشه برداری، سازمان نقشه برداری کشور

۴- استادیار گروه زمین‌شناسی تکتونیک، دانشگاه تربیت مدرس

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۳/۱۳

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۱

چکیده

رشته کوه البرز یک کمربند چین‌خورده و رانده فعال است که در شمال ایران از باختر تا کوه‌های قفقاز و از خاور در امتداد رشته کوه‌های بینالود تا شمال افغانستان ادامه می‌یابد، برخاستگی جوان در ارتباط با فعالیت گسل‌ها در هیچ کدام از بخش‌های این کوهزاد بصورت منظم انجام نشده است. در این مطالعه، با استفاده از روش‌های ترازیبی دقیق، تحلیلی از نرخ برخاستگی و فرونشست مرتبط با فعالیت گسل‌های اصلی کنترل کننده هندسه ساختاری البرز مرکزی در روندی عمود بر رشته کوه و از بخش‌های جنوبی به سمت بخش‌های شمالی آن ارایه گردیده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده آن است که بیشینه برخاستگی فعال زمین ساختی البرز مرکزی در نزدیکی گسل‌های شمال تهران (در نزدیکی کرج) و مشاء، با نرخ‌های متوسط $۱۷/۰ \pm ۰/۶$ و $۱۸/۱ \pm ۰/۶$ میلیمتر در بیست و دو سال می‌باشد. همچنین مقادیر بسیار ناچیز و نزدیک به صفر برخاستگی یا فرونشینی در محل عبور گسل‌های اصلی رشته نشان دهنده قفل‌شدگی مشهود این گسل‌ها و پتانسیل لرزه خیزی آنها می‌باشد. در مواردی نیز سایر فرایندهای زمین‌شناسی همچون فرونشست‌های ناشی از گسترش کارست‌ها توجیه کننده آنومالی‌های غیر عادی فرونشست می‌باشند که به عنوان نمونه با میزان ۱۱۸ میلیمتر در بیست و دو سال در فرودیاوه گسل کندوان ثبت شده است. همچنین بررسی ناحیه‌ای مقادیر برخاستگی‌ها در دامنه‌های شمالی و جنوبی البرز حاکی از افزایش برخاستگی و فعالیت زمین ساختی در دامنه جنوبی البرز مرکزی با نرخ $۱۰,۴ \pm ۰,۶$ میلیمتر در بیست و دو سال نسبت به دامنه شمالی آن با نرخ برخاستگی $۶,۳ \pm ۰,۶$ میلیمتر در بیست و دو سال می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: البرز، ترازیبی دقیق، قفل شدگی گسل، نرخ برخاستگی.

مقدمه

۲۲ میلیمتر در سال و همچنین چرخش به سمت شمال خاور صفحه خزر جنوبی، مرتبط است که این حرکات زمین ساخت ترفشارشی را در این کمربند کوهستانی سبب شده است (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴؛ جکسون و مکزی، ۱۹۸۴). مطالعه سامانه تعیین موقعیت یاب جهانی (GPS) نشان می‌دهد که حدود ۵۰ درصد از میزان ۲۲ میلیمتر در سال ($5 \pm 2 \text{ mm/yr}$ در صد کیلومتر) کوتاه شدگی حاصل از این همگرایی بین صفحات عربی و اوراسیا در البرز و ایران مرکزی صرف می‌شود (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴)، باقی مانده کوتاه شدگی در شمال البرز در حوضه خزر جنوبی با نرخ 6 mm/yr و در جنوب البرز با نرخ ۳ میلیمتر در سال، احتمالاً بر روی لبه بلوک ایران و در روی راندگی‌های پیشانی کوهزاد البرز رخ داده است. همچنین این سامانه موقعیت یاب جهانی میزان $4 \pm 2 \text{ mm/yr}$ برش چپ‌بر را در طول کمربند کوهستانی ثبت کرده است (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴). اندازه‌گیری‌های جدید مقادیر بالاتری حدود $11 \pm 2 \text{ mm/yr}$ نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده اولیه نشان می‌دهد (کوپلی و جکسون، ۲۰۰۶). داده‌های گراویتی مطلق و شبکه موقعیت یاب جهانی جدیدتر متشکل از ۵۴ ایستگاه، نشان دهنده حرکت امتداد لغز چپ-بر (۲ میلیمتر بر سال در قسمت جنوبی کوهزاد و ۵ میلیمتر بر سال در قسمت شمالی کوهزاد) با یک نرخ کوتاه شدگی عمود بر گسل راندگی خزر حدود ۲ میلیمتر بر سال در بخش‌های خاور البرز می‌باشد (جمور و همکاران، ۲۰۱۰). این اندازه‌گیری‌ها نشان دهنده آن است که در قسمت باختری البرز، ۶ میلیمتر بر سال کوتاه شدگی عمود بر گسل راندگی خزر و همچنین ۲ میلیمتر در سال مؤلفه چپ‌بر در شمال و ۱ میلیمتر در سال در جنوب باختر کوهزاد البرز می‌باشد (جمور و همکاران، ۲۰۱۰). داده‌های

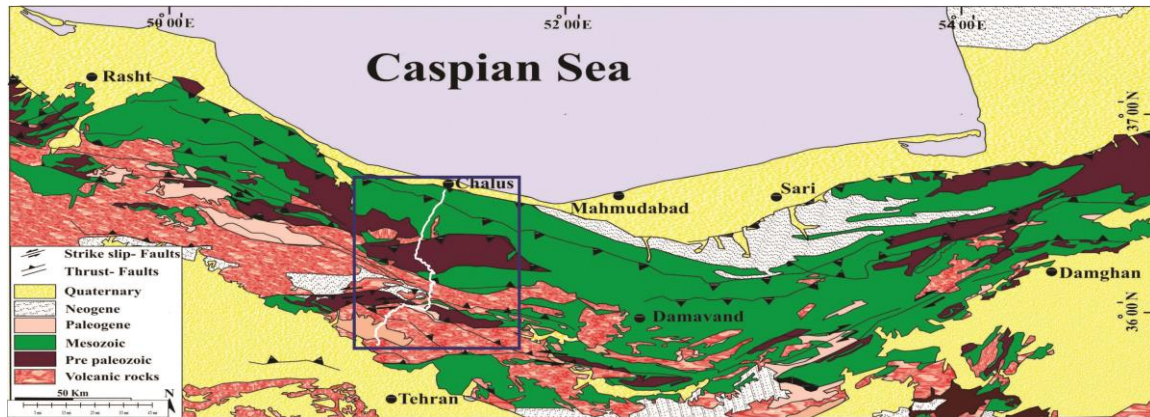
رشته‌کوه البرز با بیش از ۲۰۰۰ کیلومتر طول، با راستای عمومی خاوری - باختری، از آذربایجان تا شمال افغانستان امتداد دارد. از نظر کوه‌نگاری، مرز باختری البرز تا قفقاز کوچک و مرز خاوری آن تا کوه‌های پاراپامیسوس افغانستان گسترش دارد (علوی، ۱۹۹۱). از دیدگاه زمین ریخت شناسی، مرز شمالی البرز منطبق بر تپه ماهورهای متشکل از نهشته‌های ترشیری و دشت ساحلی خزر است. این رشته کوه در واقع مرز برخوردی قطعات گندوانایی فلات ایران با اوراسیا را می‌سازد. این کمربند کوهزادی پلی اوروژنیک است که به ویژه تحت تاثیر حرکات سیمین و آلی قرار گرفته است (اشتوکلین و همکاران، ۱۹۶۸؛ علوی، ۱۹۹۶). گسل‌های موجود در این کوهزاد با روند WNW-ESE و E-W عمدتاً مورب لغز بوده به گونه‌ای که مؤلفه‌های امتدادی آن‌ها راست‌بر و چپ‌بر و مؤلفه شیب لغز آن‌ها معکوس (آلن و همکاران، ۲۰۰۳) و نرمال (نظری، ۲۰۰۶) هستند. گسل‌های اصلی در شمال به سمت جنوب و در جنوب به سمت شمال شیب دارند (اشتوکلین و همکاران، ۱۹۶۸؛ آلن و همکاران، ۲۰۰۳). شواهدی از زمین لرزه‌ها و علائم ریخت‌زمین شناختی، مبنی بر فعالیت جوان گسل‌های واجد مؤلفه امتدادی راست‌بر گزارش نشده است (بربریان و همکاران، ۲۰۱۰). در پلیوسن خزر جنوبی به سوی باختر نسبت به اوراسیا شروع به حرکت می‌کند و دگرریختی فشارشی با مؤلفه امتدادی چپ‌بر را در طول البرز سبب می‌شود (آلن و همکاران، ۲۰۰۳). البته برخی شروع حرکت به سوی شمال باختر حوضه خزر جنوبی و یا چرخش در جهت عقربه‌های ساعت آن را به زمان پلیوستوسن میانی نسبت می‌دهند (ریتز و همکاران، ۲۰۰۶). وضعیت ساختاری کنونی البرز به حرکت‌های به سمت شمال صفحه عربی با سرعت

دقیق می‌تواند میزان محاسبه بر خاستگی را تا دقت ۰/۲ میلیمتر در هر کیلومتر ارتقاء دهند که دقت آنها حداقل بیست برابر داده‌های موقعیت یاب جهانی است. ۲- بازه زمانی برداشت داده‌های موقعیت یاب جهانی از ده سال تجاوز نکرده است، در حالی که داده‌های تراز یابی دقیق در منطقه مورد مطالعه (البرز مرکزی)، از بازه زمانی ۱۳۶۹ تا ۱۳۹۳ را پوشش می‌دهد. لذا در این مطالعه سعی بر آن است تا با استفاده از داده‌های تراز یابی دقیق تخمینی از میزان برپایی و فرونشینی عهد حاضر در راستای نواری شمالی- جنوبی عمود بر بخش مرکزی کوهزاد البرز ارایه شود. همچنین نقش ساختارهای زمین‌شناسی متفاوت در این برپایی‌ها و فرونشینی‌ها به دقت مورد تحلیل قرار خواهد گرفت. مسیر کرج به چالوس که در راستای شمالی - جنوبی البرز مرکزی را قطع می‌نماید یکی از بهترین مقاطع برای شناخت تغییرات میزان بر خاستگی در بخش‌های مختلف البرز مرکزی می‌باشد (شکل ۱). این جاده، با طولی بالغ بر ۱۶۰ کیلومتر (۱۰۰ مایل)، راه اتصالی کلان شهر کرج به شهرستان چالوس می‌باشد. نام رسمی آن با عنوان جاده ۵۹ مشخص شده است.

مواد و روش‌ها

البرز مرکزی، قسمت میانی رشته کوه البرز محسوب می‌گردد که بین طول‌های جغرافیایی 37° تا $35^{\circ}30'$ و 54° تا 50° خاوری و $35^{\circ}30'$ تا 37° شمالی واقع شده است (شکل ۱).

بدست آمده از مطالعه موقعیت یابی جهانی انطباق مناسبی را با شواهد بدست آمده در خصوص نرخ لغزش گسل‌ها با استفاده از شواهد ریخت زمین ساختی نشان می‌دهد (جمور و همکاران، ۲۰۱۰). داده‌های موقعیت یاب جهانی، عمدتاً برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های افقی بکار می‌روند و دقت آن در محاسبه جابه‌جایی‌های عمودی کمتر از میزان نرخ بالآآمدگی برآورد شده بر مبنای شواهد زمین‌شناسی از بخش‌های مختلف البرز است. مطالعات انجام شده در البرز مرکزی بر روی سن سردشدگی توده‌های نفوذی بزرگ، نشانگر حدود ۵-۷ کیلومتر بر خاستگی در شمال البرز مرکزی طی ۷ میلیون سال اخیر است (آکسن و همکاران، ۲۰۰۱). این داده‌ها اگرچه بطور کلی اطلاعاتی در خصوص تاریخچه برپایی البرز ارایه می‌نمایند ولی با توجه به خطاهای قابل ملاحظه در اندازه‌گیری آنها و همچنین نادیده گرفتن ارتباط بین فرسایش (Erosion)، برپایی (Uplift) و فرایش (Exhumation) بویژه در ارایه تخمین از نرخ برپایی کنونی کوهزاد قابل اعتماد نمی‌باشند. از این رو می‌توان برای محاسبات جابه‌جایی‌های عمودی عهد حاضر در مقیاس کوهزاد از داده‌های تراز یابی دقیق که مورد نظر در این پژوهش است استفاده نمود. این داده‌ها از نظر دقت مطالعه به هیچ عنوان قابل قیاس با داده‌های بدست آمده از مطالعات زمین‌شناسی نبوده و نسبت به داده‌های موقعیت یاب جهانی که از دقت نسبتاً مناسبی برخوردار می‌باشند نیز دو مزیت آشکار دارند: ۱- داده‌های تراز یابی



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی البرز مرکزی (محدوده مورد مطالعه با کادر مشخص است).

روی اندازه‌گیری‌های خام بستگی دارد. ترازیبی دقیق جاده چالوس - کرج در طی بیست و دو سال اخیر در سه مرحله توسط سازمان نقشه‌برداری کشور به دقت و با فاصله قرائت ۵۰ تا ۱۰۰ متر و هر قرائت دو بار به صورت رفت و برگشت برداشت شده است. با توجه به اینکه جاده مذکور، از بخش مرکزی خمیده رشته‌کوه البرز، با میزان برخاستگی نسبتاً بالا می‌گذرد، تحلیل داده‌های ترازیبی دقیق در راستای جاده مذکور می‌تواند تخمینی از نرخ فعلی برخاستگی در کوهزاد البرز مرکزی را ارائه نماید. استاندارد شبکه‌های ارتفاعی بر اساس جدول ۱ تعریف شده است.

بر اساس پژوهش‌های پیشین زمین‌ساختاری در البرز مرکزی (مانند آلن و همکاران، ۲۰۰۳؛ یساقی و معدنی پور، ۲۰۰۸؛ یساقی و نعیمی، ۲۰۱۱) و پس از تلفیق داده‌های صحرایی و ترازیبی دقیق، تحلیلی از نرخ برخاستگی موجود در البرز مرکزی و در مسیر جاده چالوس صورت پذیرفته است. ترازیبی دقیق مشتمل بر اندازه‌گیری اختلاف ارتفاع بین دو نقطه بر روی یک خط دارای دید افقی در سطح زمین است. ترازیبی دقیق با استفاده از دوربین‌های ترازیب جهت اندازه‌گیری اختلاف ارتفاع نقاط صورت می‌گیرد (بومفرد، ۱۹۸۰). دقت مورد انتظار در ترازیبی به لوازم و تجهیزات مورد استفاده و شیوه اجرایی و پردازش‌های صورت گرفته بر

جدول ۱: استاندارد شبکه‌های ارتفاعی (اقتباس از عربی و همکاران، ۱۳۸۵). K طول مسیر ترازیبی شده برحسب کیلومتر است.

تجهیزات اصلی			متوسط فاصله	معیار	درجه
بزرگنمایی ترازیب	نوع شاخص	دقت ترازیب	نقاط به کیلومتر	دقت (mm)	ترازیابی
دقت ترازیب mm ۰/۲-۰/۳ در یک کیلومتر ترازیبی رفت و برگشت و بزرگنمایی ۳۲-۴۰x شاخص انوار دولبه و دماسنج تفاضلی با دقت 0.1 c و فشار سنج با دقت 1mmHg			۲	$3\sqrt{k}^{mm}$	درجه ۱

دقت متوسط خطوط ترازیبی ایران $1/43 \text{ mm/km}$ برآورد شده است (معمارزاده و همکاران، ۱۹۹۸). که نشان از دقت بالای مشاهدات دارد که با حذف خطاهای سیستماتیک و اتفاقی از طریق مدل سازی ریاضی، دقت داده‌ها تا $0/3 \text{ mm}$ - در یک کیلومتر قابلیت ارتقاء دارد. برای دستیابی به یک ترازیبی با دقت بالا، قطعات (sections) یک خط ترازیبی بصورت یک رفت و یک برگشت اندازه‌گیری می‌شوند. به این ترتیب در هر قطعه دو اندازه‌گیری صورت می‌پذیرد، میانگین آنها به عنوان اختلاف ارتفاع نهایی آن قطعه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با توجه به دقتی که مورد نیاز است روش‌های محاسبه (محاسباتی و یا عملیاتی) باید به نحوی صورت گیرد که خطاها و عوامل موثر در بوجود آمدن آنها در مشاهدات، حذف و یا به حداقل رسانده شود. خطاهای موجود در داده‌های ترازیبی دقیق به دو دسته خطاهای سیستماتیک و خطاهای اتفاقی تقسیم می‌شوند (بومفرد، ۱۹۸۰). برای کاهش یا

حذف برآیند خطاهای سیستماتیک موثر بر مشاهدات ترازیبی، یک راه‌حل جدید مبتنی بر مدل‌سازی ریاضی رفتار اختلافات رفت و برگشت هر قطعه ترازیبی پیشنهاد می‌شود. چنانچه اختلافات رفت و برگشت هر قطعه دارای یک رفتار تصادفی باشد، به این معنی است که مشاهدات ترازیبی عاری از خطاهای سیستماتیک هستند. در این حالت بنابر قوانین تئوری خطاها، امید ریاضی خطاهای اتفاقی به سمت صفر میل می‌کند که یک حالت ایده‌آل است. ولی اگر رفتار اختلافات رفت و برگشت قطعات ترازیبی تصادفی نباشد و به عنوان مثال دارای یک روند خطی باشد در این صورت مشاهدات ترازیبی متأثر از خطاهای سیستماتیک بوده‌اند و باید به دنبال حذف این روند بود (جمور، ۱۳۹۳). پس از مدل‌سازی ریاضی می‌توان خطای سیستماتیک داده را از طریق نرم‌افزار برنامه نویسی متلب و یا حل معادلات آن، حذف نمود.

نتایج

-مدلسازی ریاضی

پس از مدل‌سازی ریاضی داده‌های ترازیبی دقیق در راستای جاده کرج- چالوس و حذف روند خطی، که در حقیقت مؤید خطای سیستماتیک است و بالانس داده‌ها براساس حذف روند خطی مذکور، داده‌ها تا حد امکان، عاری از خطاهای سیستماتیک شده‌اند (شکل ۲). در داده‌های ترازیبی مربوط به سال ۱۳۷۱، رابطه ۱ در حقیقت معادله خطی خطای سیستماتیک در مسیر مطالعه است (شکل ۱).

رابطه ۱)

$$y=0.2773x+6.2936$$

و روابط ۲ و ۳ به ترتیب، معادلات خطی خطای سیستماتیک داده‌های ترازیبی دقیق مربوط به سال‌های ۱۳۷۶ و ۱۳۸۲ از مسیر مطالعه است.

رابطه ۲)

$$y=0.1713x+4.5569$$

رابطه ۳)

$$y = 0.2565x - 10.203$$

با حذف خطاهای سیستماتیک بر اساس روابط فوق، خطای تصادفی داده‌های ترازیبی دقیق در راستای جاده کرج- چالوس بر این اساس که خطاهای تصادفی در امتداد یک خط ترازیبی به صورت $D\sqrt{\eta}$ منتشر می‌شود در نظر گرفته می‌شود که در آن D طول خط بر حسب کیلومتر و η خطای تصادفی کیلومتری بر حسب میلی‌متر در جذر کیلومتر ($\sqrt{\text{mm/km}}$) می‌باشد (بومفرد، ۱۹۸۰).

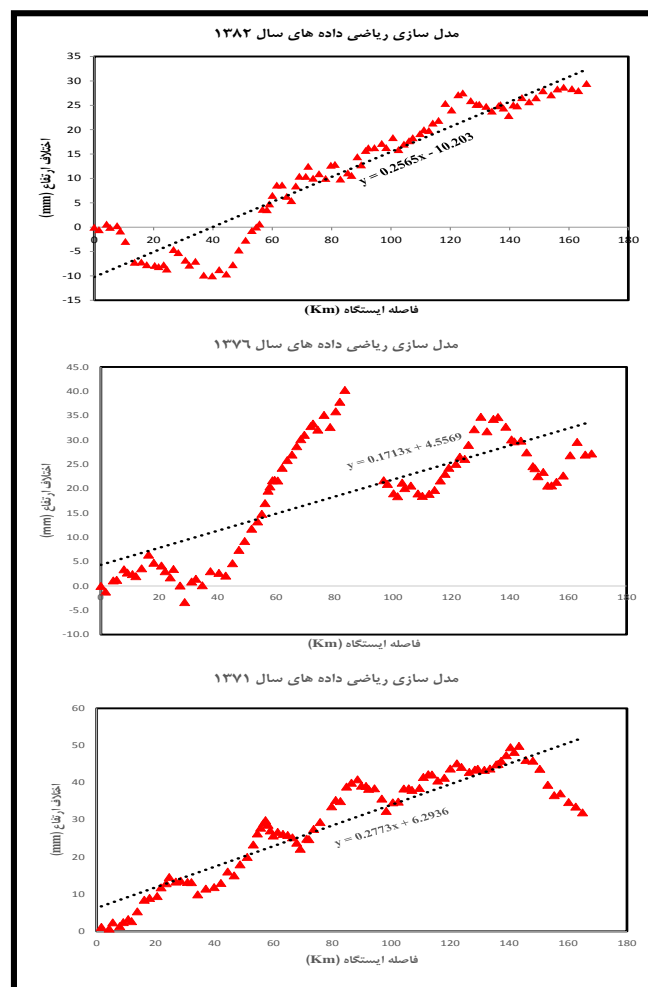
نقطه $0/69\sqrt{\text{mm/km}}$ برآورد شده است (معمارزاده و همکاران، ۱۹۹۸). این میزان با مقدار $\sqrt{\text{mm/km}}$ $0/48$ برای شبکه ترازیبی دقیق سوئد با مسافت متوسط یک کیلومتری بین نقاط قابل قیاس است (اکلفت، ۱۹۹۶).

میزان η در راستای جاده کرج- چالوس برای شبکه ترازیبی دقیق ایران با مسافت متوسط ۲ کیلومتری بین هر دو نقطه در تکرار اول، برابر $0/54\sqrt{\text{mm/km}}$ بدست آمد. میزان η در محدوده مذکور، برای داده‌های ترازیبی دقیق قرائت دوم $0/64\sqrt{\text{mm/km}}$ و برای قرائت سوم $0/48\sqrt{\text{mm/km}}$ می باشد که مؤید کیفیت مناسب این داده‌ها، در محدوده مورد مطالعه است.

روش‌های مختلفی برای محاسبه خطای تصادفی کیلومتری η با مقایسه اندازه‌گیری های رفت و برگشت بین دو نقطه وجود دارد، بومفرد (۱۹۸۰)، برای خطوط ترازیبی با فواصل بین ۱ تا ۵ کیلومتر بین دو نقطه (هر قطعه) رابطه ۴ را پیشنهاد کرده است. رابطه ۴)

$$\eta^2 = \frac{1}{4N} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta_i^2}{l_i}$$

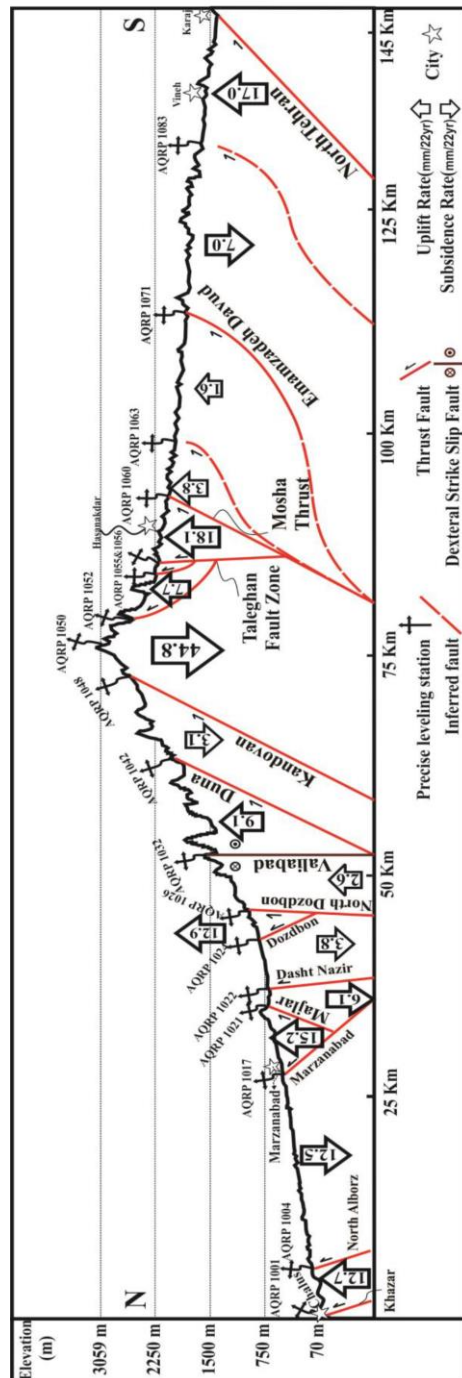
که در آن N تعداد قطعات، Δ_i (mm) اختلاف بین اندازه‌گیری های رفت و برگشت قطعه l_i م و l_i مسافت بر حسب کیلومتر قطعه l_i م می‌باشد. ضریب η برای شبکه ترازیبی دقیق ایران در تکرار اول با مسافت متوسط ۲ کیلومتری بین هر دو



شکل ۲: مدل سازی ریاضی داده‌های ترازیبی دقیق جاده کرج- چالوس

گردید و پس از انطباق داده‌های ترازیبی دقیق با داده‌های زمین‌شناسی، امکان تفسیر تغییرات نرخ بالآمدگی میسر و یافته‌های جدیدی در ایران در این مقاله ارائه گردیده است (شکل ۳).

هندسه ساختاری و تغییرات ارتفاعی البرز مرکزی پس از حذف خطاهای سیستماتیک و اتفاقی موجود در داده‌های ترازیبی دقیق در جاده کرج- چالوس، میزان برخاستگی طی بیست و دو سال محاسبه



شکل ۳: نیمرخ و ساختارهای نشان دهنده تغییرات نرخ برخاستگی در راستای جاده کرج- چالوس به همراه گسل های اصلی موجود در البرز مرکزی. براساس (گست و همکاران، ۲۰۰۶)، نقشه های ۱:۱۰۰۰۰۰ مرزن آباد (وحدتی دانشمند، ۱۳۷۹)، چالوس (وحدتی دانشمند و همکاران، ۱۳۸۰)، نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ (وحدتی دانشمند، ۱۳۷۰) و آنالیز داده های ترازیبی دقیق این پژوهش در مسیر جاده چالوس (وحدتی دانشمند، ۱۳۷۰)

جدول ۲: ایستگاه‌های ترازیبی دقیق و برآورد نرخ برخاستگی در البرز مرکزی (مسیر جاده چالوس)

ردیف	محدوده برخاستگی	نام گسل‌ها	نرخ برخاستگی (mm/22yr)
۱	AQRP 1004- AQRP 1001	گسل خزر - گسل شمال البرز	12.7
۲	AQRP 1017- AQRP 1004	گسل شمال البرز - گسل مرزن-آباد	-12.5
۳	AQRP 1021- AQRP 1017	گسل مرزن‌آباد - گسل مجلار	15.2
۴	AQRP 1022- AQRP 1021	گسل مجلار - گسل دشت نظیر	-6.1
۵	AQRP 1024- AQRP 1022	گسل دشت نظیر - گسل دزدبن	-3.8
۶	AQRP 1026- AQRP 1024	گسل دزدبن - گسل شمال دزدبن	12.9
۷	AQRP 1032- AQRP 1026	گسل شمال دزدبن - گسل ولی-آباد	2.6
۸	AQRP 1042- AQRP 1032	گسل ولی‌آباد - گسل دونا	9.1
۹	AQRP 1048- AQRP 1042	گسل دونا - گسل کندوان	-3.1
۱۰	AQRP 1052- AQRP 1048	گسل کندوان - گسل طالقان	-44.8
۱۱	AQRP 1056- AQRP 1052	زون گسله طالقان	7.7
۱۲	AQRP 1060- AQRP 1056	گسل طالقان - گسل مشاء	18.1
۱۳	AQRP 1063- AQRP 1060	زون گسله مشاء	3.8
۱۴	AQRP 1071- AQRP 1063	گسل مشاء - گسل امامزاده داود	1.6
۱۵	AQRP 1083- AQRP 1071	گسل امامزاده داود - گسل احتمالی	-7.0
۱۶	Karaj - AQRP 1083	گسل احتمالی - گسل شمال تهران	17.0

با مؤلفه کوچکتر امتداد لغز راست‌بر و چپ‌بر می‌باشند. بیشتر این گسل‌ها دارای تاریخچه فعالیت طولانی مدت در زمان زمین‌شناسی بوده و فعالیت آنها در زمان حاضر نیز با سازوکار مشابه ادامه یافته و یا در مواردی چون گسل طالقان، مشاء و شمال البرز با تغییر سازوکار همراه است. یافته‌های حاصل

گسل‌های شمال تهران، امامزاده داود، مشاء، طالقان، کندوان، دونا، ولی‌آباد، شمال و جنوب دزدبن، دشت نظیر، مجلار، مرزن‌آباد، شمال البرز و خزر به ترتیب از جنوب به سمت شمال مهمترین ساختارهای کنترل کننده البرز مرکزی می‌باشند (شکل ۳ و جدول ۲). این گسل‌ها عمدتاً دارای سازوکار راندگی

و طالقان که کنترل کننده تغییر شکل در این منطقه می‌باشند راندگی و یا امتداد لغز با مؤلفه راندگی نیست و با توجه به مولفه افقی داده‌های موقعیت یاب جهانی (جمور و همکاران، ۲۰۱۰)، حرکات جوان گسل‌های طالقان و کندوان دارای سازو کار امتدادلغز با مؤلفه کوچکتز نرمال می‌باشند. در خصوص گسل طالقان، پژوهش‌ها و مطالعات نو زمین ساختی، اشاره به سازوکار راستالغز چپ گرد با مؤلفه نرمال دارد (نظری و ریتز، ۱۳۸۷؛ نظری، ۲۰۰۶). این فعالیت‌های عهد حاضر به خوبی در داده‌های ترازیبی قابل تعقیب می‌باشند به گونه‌ای که در فرادیواره این گسل‌های اصلی که فعالیت‌های اولیه آنها بصورت راندگی بوده (یساقی و معدنی پور، ۲۰۰۸؛ یساقی و نعیمی، ۲۰۱۱)، هیچگونه برخاستگی دیده نمی‌شود که می‌تواند نشان دهنده تغییر سازوکار جوان آنها باشد. همچنین در خصوص گسل شمال البرز اگرچه فعالیت‌های قدیمی و غالب در راستای آن راندگی بوده ولی داده‌های ترازیبی نشان دهنده نرخ بالای فرونشست در فرادیواره گسل شمال البرز بوده و نشانگر تغییر سازوکار در این گسل بصورت نرمال یا امتدادلغز با مؤلفه نرمال است.

از تحلیل و آنالیز داده‌های ترازیبی دقیق در گستره مورد مطالعه به عنوان ابزاری جهت شناسایی برخاستگی‌ها و فروافتادگی‌های ناشی از مولفه راندگی فعالیت این گسل‌ها در البرز مرکزی استفاده شده است. همانگونه که در شکل ۳ قابل ملاحظه است، بیشترین نرخ برخاستگی در البرز مرکزی مربوط به فرادیواره گسل‌های شمال تهران و مشاء است. در ادامه در بخش مرکزی نیمرخ، در خط الراس البرز مرکزی که مشخص کننده موقعیت گسل کندوان می‌باشد، از مقادیر برخاستگی کاسته و بر مقادیر فرونشینی افزوده شده است (شکل ۳). بیشترین نرخ فرونشست مربوط به ایستگاه AQRP 1050 با نرخ ۱۱۸ میلیمتر در بیست و دو سال است (شکل ۴) (نرخ ۴۴/۸ میلیمتر در بیست و دو سال در شکل ۳، میانگین نرخ فرونشست در سه ایستگاه است). مطالعات میدانی انجام شده در این منطقه (معدنی پور و همکاران، ۱۳۸۸) و همچنین اطلاعات زیرسطحی موجود از سازه‌های زیرسطحی در حال انجام نشان از نشست‌های سریع این منطقه در نتیجه کارست‌های گسترش یافته در بخش‌های انیدریتی سازه‌های کرج و کند در فرودیواره گسل کندوان می‌باشد. سازوکار کنونی گسل‌های کندوان



شکل ۴: فرونشست ناشی از کارست در ایستگاه AQRP 1050 در فرودیواره گسل‌های طالقان و کندوان

بحث

مقایسه تغییرات برخاستگی و فرونشینی در مسیر مطالعه (شکل ۳) نشان دهنده آن است که نرخ برخاستگی در راستای گسل‌ها در طول ۲۲ سال بسیار اندک و یا نزدیک به صفر است ولی با دور شدن از گسل، میزان برخاستگی یا فرونشست به تبع آنکه در فرادیواره یا فرودیواره گسل باشد افزایش و یا کاهش می‌یابد. یکی از دلایلی که در این خصوص می‌توان مطرح کرد قفل شدگی (Locking) گسل‌ها در البرز مرکزی است. گسل‌های قفل شده گسل‌هایی هستند که لغزش اندک دارند زیرا مقاومت اصطکاکی روی گسل بیشتر از تنش برشی آن است. این گسل‌ها لغزش چسبنده داشته و برای مدت طولانی استرین را ذخیره می‌کنند سپس هنگامی که میزان استرین ذخیره شده بر مقاومت اصطکاکی غلبه کرد، این استرین ذخیره شده در بازه زمانی کوتاه به صورت زمین لرزه آزاد می‌گردد. در البرز مرکزی غالب گسل‌ها، دارای سازوکار معکوس و یا مؤلفه غالب معکوس می‌باشند. با دور شدن از گسل‌ها، میزان برخاستگی در فرادیواره و فرونشست در فرودیواره آنها افزایش می‌یابد. این وضعیت، نشانگر وضعیت خطرناکی برای گسل‌ها از نقطه نظر خطر لرزه خیزی در البرز مرکزی است. مورد دیگری که می‌تواند توجیه کننده کاهش برخاستگی در روی گسل‌ها باشد این است که در گسل‌های امتداد لغز میزان برخاستگی بر روی گسل حداقل یا نزدیک به صفر است. لذا از آنجایی که غالب گسل‌های البرز مرکزی واجد مؤلفه امتداد لغز (با توجه به سازوکارهای جوان) دارند، می‌توان انتظار داشت که نرخ برخاستگی بسیار کم داشته باشند. اما با توجه شیب گسل‌های موجود در البرز مرکزی، با فرض قبول تغییر ساز و کار راندگی به امتداد لغز، این گسل‌ها نمی‌توانند گسل‌های

نمونه امتداد لغز باشند و لذا واجد مؤلفه معکوس نسبتاً شاخصی هستند. وجود این مؤلفه قابل ملاحظه معکوس، برخاستگی در فرادیواره را اجتناب ناپذیر می‌نماید. همچنین اگر گسل‌های امتداد لغز قفل نشده باشند با دور شدن از گسل نایستی در فرادیواره و فرو دیواره واجد برخاستگی یا فرونشست باشند در حالی که داده‌های ترازیبی نشان دهنده مقادیر متفاوت تغییرات ارتفاع در فرادیواره و فرودیواره گسل‌ها است. به علاوه حرکات افقی ثبت شده توسط موقعیت یاب جهانی مؤید وجود مؤلفه‌های معکوس یا نرمال در گسل‌های البرز مرکزی است (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴؛ جمور و همکاران، ۲۰۱۰). بنابراین با توجه به تغییرات صفر ارتفاعی در موقعیت گسل‌های البرز مرکزی و برخاستگی نسبی فرادیواره‌ای و فرونشست فرودیواره آنها می‌توان قفل شدگی آنها را پیش‌بینی نمود. تغییرات میزان برخاستگی در بخش‌های مختلف البرز بویژه اختلاف بین بخش شمالی و جنوبی البرز مرکزی از موضوعاتی است که در مطالعات متعدد به آن پرداخته شده است (آکسن و همکاران، ۲۰۰۱؛ آلن و همکاران، ۲۰۰۳؛ گست و همکاران، ۲۰۰۶). این اختلاف برخاستگی بین دامنه‌های شمالی و جنوبی البرز مرکزی و فاکتورهای موثر بر آن عمدتاً "در بازه زمان زمین‌شناسی رخ داده است. با توجه به اینکه پیشانی تغییر شکل در کوهزاد البرز به سمت جنوب آن با نرخ و میزان بیشتری در حال گسترش می‌باشد، لذا در بازه زمانی زمین‌شناسی نیز تغییر شکل بیشتری را نسبت به بخش شمالی متحمل شده است. داده‌های بدست آمده در این تحقیق نشان دهنده آن است که نرخ برخاستگی در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی تقریباً دو برابر آن در دامنه‌های شمالی است.

نتیجه گیری

توجه به اختلاف برخاستگی و فرو نشست در فرادیواره و فرودیواره گسل‌ها، احتمال لرزه خیزی گسل طالقان نسبت به سایر گسل‌ها بیشتر می‌باشد. تحلیل داده‌های ترازیبی در این مطالعه، وجود مؤلفه نرمال در گسل‌های طالقان، کندوان و شمال البرز را نشان می‌دهد. همچنین مقادیر بیشتر و غیر عادی فرونشست مشاهده شده در فرودیواره گسل کندوان در نتیجه توسعه فروچال‌های ناشی از پدیده کارستی شدن می‌باشد. **سپاسگزاری:** این گروه پژوهشی بر خود لازم می‌داند از سازمان نقشه برداری کشور به سبب همکاری و مساعدت بی‌دریغ در طی انجام این پژوهش قدردانی نماید.

تحلیل و آنالیز داده‌های ترازیبی دقیق در البرز مرکزی نشان دهنده دو نکته اساسی است: نخست آنکه، میزان نرخ فعلی برخاستگی در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی نسبت به دامنه‌های شمالی آن بیشتر است و تمامی گسل‌های موجود در البرز مرکزی، قفل شدگی قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهند. لذا با توجه به فعال بودن گسل‌های موجود در البرز مرکزی و وجود قفل شدگی در آن‌ها، خطر فعالیت جوان و لرزه‌یابی آنها بالا است. بیشترین خطر لرزه‌خیزی بر اساس نرخ برخاستگی، در گسل‌های شمال تهران، مشاء، طالقان و کندوان است. با

منابع

بررسی‌های ریخت زمین‌ساختی، فصلنامه علوم زمین، شماره ۷۱، ۱۷۳ ص.
-وحدتی دانشمند، ف.، ۱۳۷۹. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ مرزن آباد، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
-قریب، ف.، مدنی گیوی، م.، سعیدی، ع. و حسین خان ناظر، ن.، ۱۳۷۹. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ نوشهر، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
-وحدتی دانشمند، ف.، کریم خانی، ا. و کریمی، ح. ر.، ۱۳۸۰. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چالوس، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
-وحدتی دانشمند، ف.، ۱۳۷۰. نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ آمل، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

-جموری، ی.، ۱۳۹۳. نگاهی متفاوت به مدل‌سازی ریاضی خطاهای سیستماتیک در ترازیبی، نشریه علوم و فنون نقشه‌برداری، شماره ۴، ۲۳ ص.
-عربی، س.، مالکی، ا.، کوه زارع، آ.، ایازیان ماوی، م.، معینی، ح. و جوادی، م.، ۱۳۸۵. ترازیبی دقیق ایران، انتشارات سازمان نقشه‌برداری کشور، ۲۳۳ ص.
-معدنی پور، س.، یساقی، ع.، کنعانی مقدم، ح.، عباسی، ع.ر. و گینیوسکی، ا.، ۱۳۸۸. اهمیت مطالعات زمین‌شناسی همزمان با حفاری تونل‌های طولی و عمیق، تونل پیشگام البرز، آزاد راه تهران-شمال، مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس تونل-نظری، ح. و ریتز، ژ. ف.، ۱۳۸۷. ویژگی‌های هندسی و سازو کار جوان گسل طالقان: بر پایه

-Alavi, M. 1991. Tectonic map of the Middle East, Geological Survey of Iran, Tehran.

-Alavi, M., 1996. Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountain system in northern

- Iran, *Journal of Geodynamics*, v. 21, p. 1–33.
- Allen, M. B., Ghassemi, M. R., Shahrabi, M. and Qorashi, M., 2003. Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran, *Journal of Structural Geology*, v. 25, p. 659-679.
- Axen, G. J., Lam, P. J., Grove, M., Stocklin, D. F. and Hassanzadeh, J., 2001. Exhumation of the west central Alborz Mountains, Iran, Caspian subsidence and collision-related tectonics: *Journal of Geology*, v. 29, p. 559 – 562.
- Bomford, G., 1980. *Geodesy*, Oxford University Press, 4th edition, London, 731 p.
- Copley, A. and Jackson, J., 2006. Active tectonics of the Turkish-Iranian Plateau, *Journal of Tectonics*, v. 25, TC6006, doi:10.1029/2005TC001906.
- Djamour, Y., Vernant, P., Bayer, R., Nankali, H. R., Ritz, J. F., Hinderer, J., Hatam, Y., Luck, B., Moigne, N. L., Sedighi, M. and Khorrani, F., 2010. GPS and gravity constraints on continental deformation in the Alborz Mountain range, Iran, *Journal of Geophys*, v. 183, p. 1287–1301.
- Egeltoft, T., 1996. Data analysis and adjustment in precise levelling: Doctoral Dissertation, Royal Institute of Technology Department of Geodesy and Photogrammetry Stockholm, Sweden, 1040 p.
- Guest, B., Axen, G. J., Lam, P. S. and Hassanzadeh, J., 2006a. Late Cenozoic shortening in the west central Alborz Mountains, northern Iran, by combined conjugate strike-slip and thin-skinned deformation, *Journal of Geosphere*, v. 2, p. 35 – 52.
- Guest, B., Stockli, D. F., Grove, M., Axen, G. J., Lam, P. S. and Hassanzadeh, J., 2006b. Thermal histories from the central Alborz mountains, northern Iran, Implications for the spatial and temporal distribution of deformation in northern Iran, *Journal of Geology*, v. 118, p. 1507 – 1521.
- Jackson, J.A. and McKenzie, D.P., 1984. Active tectonics of the Alpine–Himalayan belt between western Turkey and Pakistan, *Journal of Geophysics*, v. 77, p. 185–264.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M. and Berberian, M., 2002. Active tectonics of the South Caspian basin, *Journal of Geophysics*, v. 148, p. 214–245.
- Memarzadeh, Y., 1998. Refraction effect and statistical analysis of the Iranian first order precise levelling data, M.Sc. thesis, Dep. of Surveying Engineering, K. N. Toosi University, Tehran, Iran, 156 p.
- Nazari, H., 2006. Analyse de la tectonique récente et active dans l'Alborz Central et la région de Téhéran: Approche morphotectonique et paléoseismologique, Faculté des Sciences et des techniques du Languedoc I: Université Montpellier II (France), 246 p.
- Ritz, J. F., Nazari, H., Salamati, R., Shafeii, A., Solaymani, S. and Vernant, P., 2006. Active transtension inside Central Alborz: a new insight into the Northern Iran–Southern Caspian geodynamics: *Journal of Geology*, v. 34, p. 477–480.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F. and Chéry, J., 2004. Present-day crustal deformation and plate kinematics in Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman, *Geophysical Journal International*, v. 157, p. 381–398.
- Yassaghi, A. and Madanipour, S., 2008. Influence of a transverse basement fault on along strike variations in the geometry of an inverted normal fault, case study of the Mosha Fault, Central

Alborz Range, Iran: Journal of Structural Geology, v.30, p. 1507-1519.

-Yassaghi, A. and Naeimi, A., 2011. Structural analysis of the Gachsar sub-

zone in central Alborz range; constrain for inversion tectonics followed by the range transverse faulting, Journal of Earth Sciences, v. 100, p. 1237-1249.